

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 987 706**

51 Int. Cl.:

**C21B 5/06** (2006.01)

**C21B 13/00** (2006.01)

12

## TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **28.06.2021** **PCT/EP2021/067704**

87 Fecha y número de publicación internacional: **30.12.2021** **WO21260225**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **28.06.2021** **E 21742048 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **19.06.2024** **EP 4172373**

54 Título: **Un sistema de reducción directa y un proceso relativo**

30 Prioridad:

**26.06.2020 IT 202000015472**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**15.11.2024**

73 Titular/es:

**DANIELI & C. OFFICINE MECCANICHE S.P.A.**  
**(50.0%)**  
**Via Nazionale 41**  
**33042 Buttrio, IT y**  
**HYL TECHNOLOGIES, S.A. DE C.V. (50.0%)**

72 Inventor/es:

**FRANCO, BARBARA;**  
**MARTINIS, ALESSANDRO y**  
**MARTINEZ MIRAMONTES, JORGE EUGENIO**

74 Agente/Representante:

**ELZABURU, S.L.P**

ES 2 987 706 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Un sistema de reducción directa y un proceso relativo

## Campo de la invención

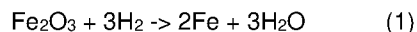
La presente invención se refiere a un sistema de reducción directa y a un proceso relativo, adaptados, en particular, para la producción de hierro metálico por medio de reducción directa de óxidos de hierro usando un gas reductor.

## Antecedentes de la invención

Los sistemas para la producción de mineral de hierro reducido (DRI - Hierro Reducido Directo) del tipo conocido comprenden un reactor, en el cual se carga óxido de hierro, en forma de pelets y/o terrones, y una línea para tratar y suministrar un gas reductor, que comprende hidrógeno y monóxido de carbono, y adaptados para reducir dicho óxido de hierro en el reactor. El gas reductor se inyecta en una cámara de reacción, o reactor, a una temperatura elevada. El reactor puede ser del tipo lecho estático, o del tipo lecho móvil, o del tipo lecho fluidizado, o del tipo rotatorio u horno. En un reactor de lecho móvil, el gas reductor se introduce típicamente en la parte central del reactor, se hace subir en contraflujo a través del óxido de hierro, y a continuación se extrae, se reprocesa y se recicla en un circuito de reducción. El gas de escape que sale del reactor se desempolva, se separan los productos de reacción ( $H_2O$  y  $CO_2$ ) y se comprime; se mezcla a continuación con un gas de nueva aportación (gas natural, COG, gas obtenido en un reformador, gas corex, gas de síntesis, etc.). El flujo de gas, definido por la mezcla del nuevo gas de nueva aportación y el gas de escape reciclado después de un tratamiento apropiado, se envía a una unidad de calentamiento, que lo lleva a la temperatura requerida por el proceso de reducción, normalmente por encima de  $850^\circ C$ .

El flujo calentado de gas reductor, en el cual se puede inyectar oxígeno con el objeto de aumentar aún más la temperatura del mismo, se envía al reactor, en el cual los óxidos de hierro a reducir, en forma de pelets y/o terrones, se introducen desde arriba y fluyen hacia abajo a través del mismo, mientras que el DRI (producto de reducción) se extrae por el extremo opuesto de dicho reactor y se envía mediante un sistema de transporte neumático o por gravedad o por cintas a un alto horno o a un horno de arco eléctrico o a un convertidor de oxígeno o a cualquier dispositivo capaz de fundir el DRI producido.

Con mayor detalle, en el proceso de reducción directa del óxido de hierro, el oxígeno se elimina del mineral de hierro por medio de reacciones químicas con hidrógeno y monóxido de carbono, para obtener DRI con un alto grado de metalización (relación entre hierro metálico y hierro total contenido en el DRI). Las reacciones de reducción globales implicadas en el proceso son bien conocidas y se muestran a continuación:



El hidrógeno y el monóxido de carbono reaccionan con el oxígeno del óxido de hierro y se transforman en agua y dióxido de carbono según las reacciones (1) y (2). Además de  $H_2O$  y  $CO_2$ , también están presentes en el gas de escape que sale del reactor  $H_2$  y  $CO$  sin reaccionar. El gas de escape se trata como se ha descrito anteriormente con el objeto de recuperar estos agentes reductores.

El uso de un gas de nueva aportación alimentado al circuito de reducción que contenga una cantidad significativa de carbono (un gas que contenga hidrocarburos gaseosos tal como gas natural, gas de horno de coque, gas corex, gas de síntesis, etc.) tiene principalmente dos desventajas:

- Emisiones de gases de efecto invernadero ( $CO_2$ );
- Un contenido relativamente elevado de monóxido de carbono (CO) en el flujo de gas reductor que entra en el reactor, lo que puede conducir a una producción de finos relativamente elevada durante la reacción de reducción y, debido al aumento de temperatura porque la reducción con monóxido de carbono es exotérmica, puede aumentar el riesgo de generación de racimos, que dificultan el desplazamiento de la masa sólida.

En el esquema de un proceso usado actualmente, las emisiones de  $CO_2$  se reducen mediante la eliminación selectiva de  $CO_2$  de los gases de escape reciclados al reactor (que pueden ser almacenados y utilizados en la industria alimentaria o para otras aplicaciones industriales) y tales emisiones consisten principalmente en dióxido de carbono liberado a través de la chimenea de un reformador (cuando está presente) de gases hidrocarbonados o de la unidad de calentamiento del gas reductor. Con respecto a otros procesos de reducción directa conocidos, el proceso descrito anteriormente, que se suministra con gas natural para promover reacciones de reformado de metano dentro del reactor de reducción, o que se suministra con gas reformado producido por un reformador fuera de línea, garantiza sin embargo una buena relación  $H_2/CO$  en la composición del gas reductor que se introduce en el reactor.

Actualmente, una reducción adicional de las emisiones de CO<sub>2</sub> es extremadamente difícil.

Por lo tanto, se siente la necesidad de desarrollar un sistema de reducción directa y un proceso relativo capaces de superar los inconvenientes mencionados anteriormente.

### Sumario de la invención

5 Es un objeto de la presente invención desarrollar un sistema de reducción directa y un proceso relativo para permitir una reducción adicional de las emisiones de dióxido de carbono, que en algunas realizaciones esté ventajosamente por debajo de 40 Nm<sup>3</sup>/t<sub>DRI</sub>.

10 Es un objeto adicional de la presente invención desarrollar un sistema de reducción directa que sea flexible en términos de gas de nueva aportación, que significa que puede alimentarse, sin perturbar al equipo del circuito de reducción y/o sin largos periodos de parada, con diferentes tipos de gases de nueva aportación o incluso mezclas de los mismos, seleccionándose estos cambios en la alimentación de gas de nueva aportación basándose en la disponibilidad o costes en el mercado. Ejemplos de tecnologías relacionadas pueden encontrarse, por ejemplo, en los documentos EP0428098A2 y DE2459814B1.

15 La presente invención consigue tales objetos y otros objetos, que serán evidentes a la luz de la presente descripción, por medio de un sistema de reducción directa para una reducción directa de óxidos de hierro, que, según la reivindicación 1, comprende un circuito dotado de:

- Un reactor que tiene una zona de reducción adaptada para ser cargada con dichos óxidos de hierro;
- Una primera fuente externa de gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso con un contenido de hidrógeno gaseoso igual a al menos 80% en volumen;
- 20 • Una segunda fuente externa de gas de nueva aportación que contiene hidrocarburos gaseosos, preferiblemente con un contenido de hidrocarburos gaseosos igual a al menos 25% en volumen;
- Una línea de recuperación y de tratamiento, dispuesta aguas abajo del reactor, para recuperar y tratar el gas de escape que sale del reactor;
- 25 • Una línea de tratamiento y de alimentación, dispuesta aguas arriba del reactor, para tratar un gas de proceso, obtenido mezclando gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso procedente de la primera fuente externa y/o del gas de nueva aportación que contiene hidrocarburos gaseosos procedente de la segunda fuente externa con el gas de escape tratado en la línea de recuperación y de tratamiento, y para alimentar la zona de reducción del reactor con dicho gas de proceso;
- 30 en donde la línea de recuperación y tratamiento comunica aguas abajo con dicha línea de tratamiento y alimentación;
- en donde la línea de recuperación y tratamiento comprende al menos un primer dispositivo de intercambio de calor donde el calor se transfiere desde el gas de escape a un fluido de transferencia de calor;
- en donde la línea de tratamiento y alimentación comprende al menos un segundo dispositivo de intercambio de calor;
- 35 en donde un conducto, capaz de transportar el fluido de transferencia de calor, conecta el al menos un primer dispositivo de intercambio de calor con el al menos un segundo dispositivo de intercambio de calor por lo que el calor del fluido de transferencia de calor puede transferirse a dicho gas de proceso por medio de dicho al menos un segundo dispositivo de intercambio de calor;
- 40 en donde la línea de recuperación y tratamiento también comprende además un dispositivo de separación de dióxido de carbono, para separar el dióxido de carbono del gas de escape;
- en donde el conducto tiene una rama que conecta dicho conducto con el al menos un dispositivo de separación de dióxido de carbono, por lo que el calor del fluido de transferencia de calor puede transferirse completa o parcialmente a dicho al menos un dispositivo de separación de dióxido de carbono;
- 45 y en donde dicha primera fuente externa y dicha segunda fuente externa están conectadas con dicha línea de tratamiento y alimentación o con dicha línea de recuperación y tratamiento. Preferiblemente, el al menos un segundo intercambiador de calor está colocado entre un humidificador y una unidad de calentamiento, estando dispuestos dicho humidificador y dicha unidad de calentamiento en dicha línea de tratamiento y alimentación.

Opcionalmente, el al menos un primer dispositivo de intercambio de calor se coloca entre el reactor y al menos una unidad de lavado y enfriamiento para separar el agua del gas de escape, obteniendo un gas deshidratado, estando dicha al menos una unidad de lavado y enfriamiento dispuesta en dicha línea de recuperación y tratamiento.

5 Preferiblemente, se proporciona un conducto adicional que conecta una línea de descarga de la al menos una unidad de lavado y enfriamiento con el humidificador para transportar agua caliente al humidificador.

En esta descripción, la expresión "gas de proceso" significa la mezcla de gases obtenida mezclando el gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso procedente de la primera fuente externa y/o el gas de nueva aportación que contiene hidrocarburos gaseosos procedente de la segunda fuente externa con el gas de escape tratado en la línea de recuperación y tratamiento.

10 Según un aspecto adicional de la invención, se proporciona un proceso de reducción directa, que puede llevarse a cabo por medio del sistema mencionado anteriormente, que, según la reivindicación 9, cuando está completamente operativo comprende las siguientes etapas:

a) Recuperar y tratar el gas de escape que sale del reactor por medio de la línea de recuperación y tratamiento;

15 b) Alimentar gas de proceso a una zona de reducción del reactor por medio de la línea de tratamiento y alimentación, obteniéndose dicho gas de proceso mezclando el gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso procedente de la primera fuente externa y/o el gas de nueva aportación que contiene hidrocarburos gaseosos procedente de la segunda fuente externa con el gas de escape tratado en la línea de recuperación y tratamiento;

en donde se proporcionan además las etapas de:

20 • Transferir calor de los gases de escape que salen del reactor a un fluido de transferencia de calor por medio del al menos un primer dispositivo de intercambio de calor de la línea de recuperación y de tratamiento; y

25 • Si el gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso procedente de la primera fuente externa es suficiente, mezclado con el gas de escape tratado en la línea de recuperación y tratamiento, para el proceso de reducción directa, el calor del fluido de transferencia de calor se transfiere completamente a dicho gas de proceso por medio del conducto que lleva el fluido de transferencia de calor a al menos un segundo dispositivo de intercambio de calor de la línea de tratamiento y alimentación, mientras que si el gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso procedente de la primera fuente externa no está disponible o no es suficiente, mezclado con el gas de escape tratado en la línea de recuperación y tratamiento, para el proceso de reducción directa, el gas de nueva aportación que contiene hidrocarburos gaseosos procedente de la segunda fuente externa se mezcla con dicho gas de escape, o con dicho gas de escape y dicho gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso, y el calor del fluido de transferencia de calor se transfiere, respectivamente, completa o parcialmente, a dicho al menos un dispositivo de separación de dióxido de carbono.

35 La primera fuente externa de gas de nueva aportación puede ser una fuente de hidrógeno gaseoso comercialmente puro o una fuente de gas reductor enriquecido con hidrógeno gaseoso, con un contenido de hidrógeno gaseoso igual a al menos el 80% en volumen. El gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso puede proceder de cualquier fuente externa, que utilice, por ejemplo, la combustión parcial o el reformado de gas natural, electrólisis o cualquier otro proceso capaz de generar dicho tipo de gas.

40 La segunda fuente externa de gas de nueva aportación puede ser una fuente de un gas que contenga hidrocarburos gaseosos, preferiblemente con un contenido de hidrocarburos gaseosos igual a al menos el 25% en volumen, tal como gas natural, gas de horno de coque, gas corex, gas de síntesis, etc.

45 El sistema y método de la presente invención permiten que se produzca DRI alimentando el circuito con solo gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso, o con solo gas de nueva aportación que contiene hidrocarburos gaseosos, o con una mezcla, en cualquier proporción, de gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso y gas de nueva aportación que contiene hidrocarburos gaseosos según cualquier disponibilidad y conveniencia particulares.

50 Preferiblemente, el sistema y el método de la presente invención permiten, por lo tanto, un cambio continuo desde fuentes de gases reductores disponibles tradicionalmente (gas natural, gas de horno de coque, gas de reformado, gas Corex, etc.) a fuentes de gases reductores respetuosas con el medio ambiente nuevamente disponibles (hidrógeno gaseoso o gas enriquecido con hidrógeno gaseoso), sin la necesidad de modificaciones relevantes de la planta sino solo a través del ajuste de algunos parámetros de trabajo del proceso.

En su lugar, en particular, las tecnologías de la técnica anterior no pueden cambiar directamente al uso de hidrógeno gaseoso en alta proporción sin incurrir antes en una etapa de rediseño y modificaciones relevantes de la planta.

Como ejemplo, dichos parámetros de trabajo del proceso pueden ser la presión del sistema o la cantidad de nitrógeno inyectada.

Cuando el sistema funciona utilizando solamente gas de nueva aportación que contiene hidrocarburos gaseosos, la presión del sistema, medida a la salida del reactor, será mayor (por ejemplo, entre 5 y 7 barg) que la presión del sistema cuando el sistema funciona utilizando solamente gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso (donde, por ejemplo, la presión puede ajustarse entre 3 y 5 barg). Cuando se trabaja con una mezcla de gas de nueva aportación que contiene hidrocarburos gaseosos y gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso, la presión del sistema será una presión intermedia.

En un ejemplo, el ajuste de la presión de funcionamiento del sistema permite compensar parcial o completamente las diferentes características del gas que circula en el sistema, siendo dichas diferentes características debidas a los diferentes porcentajes de uso del gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso y del gas de nueva aportación que contiene hidrocarburos gaseosos. De esta manera, la respuesta dinámica fluida de las máquinas dispuestas en el circuito del sistema será sustancialmente equivalente tanto trabajando con un gas que contiene hidrocarburos a alta presión (gas de alto peso molecular) como trabajando con un gas que contiene hidrocarburos a baja presión (gas de bajo peso molecular).

En particular, para compensar parcial o completamente las diferentes características del gas que circula en el sistema, se proporciona una inyección de nitrógeno tanto para aumentar el peso molecular del gas de proceso circulante sin cambiar sus características reductoras como para usar el nitrógeno presente en el gas circulante como vector de energía térmica dentro del reactor de reducción. Más en detalle, el paso desde el uso de gas de nueva aportación que contiene hidrocarburos gaseosos a gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso produce una descompensación de presión, en particular en los dispositivos 42, 42' de bombeo dispuestos respectivamente en los conductos 40 y 54. Una solución posible es inyectar nitrógeno en el circuito cuando se utiliza gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso. De esta manera, la mezcla de gas reductor es más pesada y el dispositivo de bombeo funciona de manera óptima.

Preferiblemente, la inyección de nitrógeno, u otro gas adecuado (por ejemplo, CO<sub>2</sub>) se lleva a cabo en el dispositivo de bombeo.

En algunas realizaciones preferidas de la invención, el fluido de transferencia de calor es agua, por lo que se produce vapor de agua en el primer intercambiador de calor y se transporta a través del conducto que conecta dicho primer intercambiador de calor con el segundo intercambiador de calor.

El vapor de agua, u otro fluido de transferencia de calor, que proviene del primer intercambiador de calor puede usarse en el segundo intercambiador de calor para aumentar la temperatura del gas de proceso reductor que va a la unidad de calentamiento, disminuyendo así el consumo de energía.

Si no está disponible un gas que contenga hidrógeno gaseoso y el sistema necesita trabajar con un gas que contiene hidrocarburos gaseosos, tal como gas natural o gas de horno de coque o gas de síntesis u otro tipo de gas reductor, el vapor de agua, u otro fluido de transferencia de calor, que proviene del primer intercambiador de calor puede ser fácilmente desviado al dispositivo de separación de dióxido de carbono para separar, por ejemplo absorbiendo, dióxido de carbono con el fin de regenerar la solución de amina.

El vapor de agua, u otro fluido de transferencia de calor, puede usarse de manera flexible para precalentar el gas reductor de proceso en el segundo intercambiador de calor y/o usarse en el funcionamiento del dispositivo de separación para separar dióxido de carbono. La cantidad de vapor de agua, u otro fluido de transferencia de calor, destinado para cada uso se establece de manera flexible según la proporción de la cantidad de gas que contiene hidrógeno gaseoso y la cantidad de gas que contiene hidrocarburos gaseosos alimentada al circuito del sistema de reducción.

En resumen, el sistema de reducción directa de la invención es capaz de adaptarse para funcionar utilizando como gas de nueva aportación una amplia variedad de fuentes de gases que contienen hidrocarburos gaseosos y/o fuentes de gases que contienen hidrógeno gaseoso u otras fuentes de gases reductores que emerjan a lo largo de los años, sin alterar el equipo y permitir un cambio vivo entre una fuente y la otra.

Otra ventaja de la presente invención es la posibilidad de continuar el funcionamiento, asegurando una alta disponibilidad del proceso y una pérdida despreciable de producción, cuando el gas que contiene hidrógeno gaseoso no está disponible por cualquier razón.

De hecho, la configuración del sistema permite la sustitución del gas que contiene hidrógeno gaseoso por un gas que contiene hidrocarburos gaseosos con ajustes sencillos en el funcionamiento del sistema.

Opcionalmente, se puede proporcionar una inyección de gas adicional que contiene hidrocarburos gaseosos, tal como gas natural, en una zona inferior, preferiblemente cónica, del reactor colocada debajo del área de reducción, por medio de al menos un dispositivo para inyectar dicho gas adicional que contiene hidrocarburos gaseosos.

A continuación se muestran algunas de las ventajas adicionales de la solución de la presente invención con respecto al estado de la técnica:

- 5
  - El dispositivo para separar, por ejemplo absorbiendo, dióxido de carbono puede ser parcial o totalmente baipaseado, según el porcentaje de gas de nueva aportación que contiene hidrocarburos gaseosos presente en la mezcla de alimentación;
  - El humidificador posible, requerido para aumentar el contenido de agua en el gas de proceso, evitando así la deposición de carbono dentro de la unidad de calentamiento de gas de proceso, puede ser completamente baipaseado por un conducto de baipaseo adicional simple cuando solo se alimenta al circuito gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso;
- 10
  - En general, al aumentar el contenido de hidrógeno gaseoso en el gas alimentado al circuito, la deposición de carbono dentro de la unidad de calentamiento es extremadamente limitada, si la hay, y no son necesarias paradas del sistema para llevar a cabo la limpieza química, aumentando así la fiabilidad y disponibilidad del sistema;
- 15
  - Cuando el flujo de gas reductor es hidrógeno gaseoso puro o casi puro, no se requiere energía adicional para promover las reacciones de reformado en el interior del reactor, por lo que la inyección de oxígeno aguas abajo de la unidad de calentamiento puede ser interrumpida;
- 20
  - Puesto que el gas de proceso resultante tiene preferiblemente un contenido bastante bajo de CO y CO<sub>2</sub>, la acidificación del agua de proceso, que entra en contacto con el gas de proceso, es extremadamente limitada y no requiere materiales costosos en las líneas de retorno de agua o consumos elevados de agentes químicos para controlar la calidad del agua;
  - El alto grado de reducción de mineral de hierro con el hidrógeno gaseoso, que determina una reducción de la temperatura en el interior del reactor, permite operaciones más regulares, que están casi desprovistas de riesgos de agrupamiento (lo cual es típico en la reducción con CO y su reacción exotérmica, como es el hinchamiento);
- 25
  - La introducción directa en el circuito de hidrógeno gaseoso comercialmente puro o de un gas que contiene hidrógeno gaseoso con un contenido elevado de hidrógeno gaseoso aumenta la eficiencia de los sistemas actuales de reducción directa (tales como el proceso ZR o los procesos con un reformador en línea) basados en gases que contienen hidrocarburos gaseosos (tales como gas natural o gas de horno de coque);
- 30
  - Se minimiza el fenómeno de hinchamiento de los pelets al poner en marcha el reactor, siendo dicho fenómeno característico del uso de CO como agente reductor, que puede provocar la detención del flujo de sólidos y la obstrucción del reactor.

Características y ventajas adicionales de la invención resultarán más evidentes a la luz de la descripción detallada de realizaciones ilustrativas, pero no exclusivas. Las reivindicaciones dependientes describen realizaciones particulares de la invención.

### 35 Breve descripción de las figuras

En la descripción de la invención, se hará referencia a las tablas de dibujos adjuntos, que se dan a título de ejemplos no limitantes, en donde:

La Figura 1 ilustra un diagrama de una primera realización de un sistema de reducción directa según la invención;

La Figura 2 ilustra un diagrama de una segunda realización de un sistema de reducción directa según la invención.

### 40 Descripción de realizaciones ilustrativas de la invención

Algunos ejemplos de un sistema de reducción directa, que forma el objeto de la presente invención, se ilustran con referencia a las Figuras 1 y 2, que comprende un circuito provisto de:

- Un reactor 1 que tiene una zona 12 de reducción adaptada para ser cargada con óxidos de hierro a través de un conducto 2 de entrada;
- 45
  - Una primera fuente externa 200 de gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso con un contenido de hidrógeno gaseoso, o contenido de gas hidrógeno, igual a al menos 80% en volumen;
  - Una segunda fuente externa 210 de gas de nueva aportación que contiene hidrocarburos gaseosos, preferiblemente con un contenido de hidrocarburos gaseosos igual a al menos 25% en volumen;

- Una línea 10 de recuperación y de tratamiento, dispuesta aguas abajo del reactor 1, para recuperar y de tratar el gas de escape que sale del reactor 1;
- Una línea 11 de tratamiento y alimentación, dispuesta aguas arriba del reactor 1, para tratar una mezcla de gases, que define un gas de proceso, obtenida mezclando el gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso procedente de la primera fuente externa 200 y/o el gas de nueva aportación que contiene hidrocarburos gaseosos procedente de la segunda fuente externa 210 con el gas de escape tratado en la línea 10 de recuperación y tratamiento, y para alimentar la zona 12 de reducción del reactor 1 con dicho gas de proceso.

La línea 10 de recuperación y tratamiento comunica aguas abajo con dicha línea 11 de tratamiento y alimentación.

- La línea 10 de recuperación y tratamiento comprende al menos un primer dispositivo 22 de intercambio de calor, por ejemplo, solo un primer dispositivo de intercambio de calor, donde el calor se transfiere desde el gas de escape a un fluido 70 de transferencia de calor.

- Ventajosamente, la línea 11 de tratamiento y alimentación comprende al menos un segundo dispositivo 72 de intercambio de calor, por ejemplo, solo un segundo dispositivo de intercambio de calor, y se proporciona un conducto 75, preferiblemente solo un conducto 75, capaz de transportar el fluido de transferencia de calor y conectar el primer dispositivo 22 de intercambio de calor con el segundo dispositivo 72 de intercambio de calor, por lo que el calor del fluido de transferencia de calor puede transferirse al gas de proceso por medio del segundo dispositivo 72 de intercambio de calor.

- Además, la línea 10 de recuperación y tratamiento también comprende al menos un dispositivo 50 de separación de dióxido de carbono, por ejemplo, solo un dispositivo de separación, para separar, por ejemplo, absorber, dióxido de carbono del gas de escape.

- Ventajosamente, el conducto 75 tiene una rama 76 que conecta dicho conducto 75 con el dispositivo 50 de separación de dióxido de carbono, por lo que el calor del fluido de transferencia de calor puede transferirse completa o parcialmente a dicho dispositivo 50 de separación si el gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso no está disponible o solo está parcialmente disponible, respectivamente. Preferiblemente, para regular mejor el funcionamiento del sistema de reducción directa a partir de datos de entrada que incluyen, o que consisten en, datos de disponibilidad del gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso, el sistema de la invención comprende:

- Un conducto 52 de baipás en la línea 10 de recuperación y de tratamiento para baipasear el dispositivo 50 de separación;
- Un primer dispositivo 62 de regulación del caudal, colocado a lo largo de la rama 76, para regular el caudal del fluido de transferencia de calor hacia el dispositivo 50 de separación;
- Un segundo dispositivo 65 de regulación del caudal, a lo largo del conducto 75 de regulación del caudal del fluido de transferencia de calor hacia el segundo dispositivo 72 de intercambio de calor;
- Un tercer dispositivo 63 de regulación del caudal para cerrar o al menos abrir parcialmente el conducto 52 de baipaseo;
- Un cuarto dispositivo 32 de regulación del caudal para regular el caudal del gas de nueva aportación que contiene hidrocarburos gaseosos que se va a alimentar al circuito de circulación de gas;
- Un quinto dispositivo 31 de regulación del caudal para regular el caudal del gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso que va a alimentar al circuito de circulación de gas.

- Opcionalmente, como se muestra por ejemplo en la Figura 2, una unidad 64 de control está configurada para enviar respectivamente una señal 110 de control a dicho primer dispositivo 62 de regulación del caudal, una señal 111 de control a dicho segundo dispositivo 65 de regulación del caudal, una señal 112 de control a dicho tercer dispositivo 63 de regulación del caudal, una señal 114 de control a dicho cuarto dispositivo 32 de regulación del caudal y una señal 116 de control a dicho quinto dispositivo 31 de regulación del caudal según datos de entrada que incluyen una señal 118 indicativa de la disponibilidad del gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso. La unidad 64 de control también puede proporcionarse en la realización de la Figura 1.

- Ventajosamente, en todas las realizaciones de la invención, la primera fuente externa 200 de gas reductor de nueva aportación es una fuente de hidrógeno gaseoso comercialmente puro (al menos 99% en volumen) o una fuente de gas con un contenido de hidrógeno gaseoso igual a al menos 80% en volumen, preferiblemente igual a al menos un valor de 85 a 98% en volumen.

En el caso de un gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso con un contenido de hidrógeno gaseoso igual a al menos 80% en volumen, el resto de la composición puede comprender monóxido de carbono, agua, dióxido de carbono, metano y nitrógeno.

5 Puramente a modo de ejemplo, una composición de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso puede ser como sigue en porcentaje en volumen:

Hidrógeno gaseoso en el intervalo de 92-96%;

Monóxido de carbono en el intervalo de 1,5-2,5%;

Agua 0,2-0,6%;

Dióxido de carbono 0,0-0,4%;

10 Metano 0,3-0,9%;

Nitrógeno 2,0-4,0%.

La segunda fuente externa 210 de gas reductor de nueva aportación es una fuente de un gas que contiene hidrocarburos gaseosos con un contenido de hidrocarburos gaseosos igual a al menos 25% en volumen, tal como gas natural, gas de horno de coque, gas corex, gas de síntesis, etc.

15 Dicho gas que contiene hidrocarburos gaseosos también puede ser gas procedente de biomasa, biogás o biometano.

Dicha segunda fuente externa 210 está normalmente cerrada pero, en caso de poca o ninguna disponibilidad de dicho gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso, puede abrirse para usar dicho gas que contiene hidrocarburos gaseosos en el circuito.

20 Preferiblemente, el al menos un primer dispositivo 22 de intercambio de calor está proximal al reactor 1, mientras que dicho al menos un dispositivo 50 de separación está distal del reactor 1 y proximal a la línea 11 de tratamiento y alimentación.

Ventajosamente, en todas las realizaciones, la línea 11 de tratamiento y alimentación puede comprender o puede consistir en:

25 • Primeros conductos por los que pasa el gas de proceso, obtenido mezclando el gas de escape tratado procedente del reactor 1 con el gas reductor de nueva aportación procedente de la primera fuente externa 200 y/o la segunda fuente externa 210;

• Al menos un humidificador 60, por ejemplo, sólo un humidificador, para regular el contenido de agua del gas de proceso en caso de un contenido alto de  $\text{CH}_4$  y de hidrocarburos gaseosos pesados en dicho gas de proceso;

30 • El segundo intercambiador de calor 72, por ejemplo, un condensador, para recuperar la energía térmica del fluido de transferencia de calor procedente del primer intercambiador de calor 22;

• Al menos una unidad 180 de calentamiento, por ejemplo, sólo una unidad de calentamiento, para calentar el gas de proceso a una temperatura adecuada para la introducción en el reactor 1.

35 El humidificador 60 puede ser completamente baipaseado por un simple conducto 80 adicional de baipás cuando solamente se alimenta al circuito gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso.

Aguas abajo de dicha unidad 180 de calentamiento puede proporcionarse un dispositivo 300 de inyección de oxígeno para inyectar oxígeno en el flujo de gas de proceso.

Otra ventaja del sistema de la invención está representada por el hecho de que la línea 10 de recuperación y tratamiento puede comprender o puede consistir en:

40 • Segundos conductos por los que pasa el gas de escape que sale del reactor 1;

• El primer intercambiador de calor 22, por ejemplo, sólo un primer intercambiador de calor, para enfriar el gas de escape que sale del reactor 1;

45 • Al menos una unidad 36 de lavado y enfriamiento, por ejemplo, una sola unidad de lavado y enfriamiento, dispuesta aguas abajo de dicho primer intercambiador de calor 22 para separar el agua del gas de escape, obteniendo un gas deshidratado;



- Preferiblemente al menos un dispositivo 42 de bombeo, por ejemplo, solo un dispositivo de bombeo, para bombear el gas deshidratado hacia la línea 11 de tratamiento y alimentación;
- El dispositivo 50 de separación de dióxido de carbono, por ejemplo, un dispositivo de absorción, dispuesto aguas abajo de dicha al menos una unidad 36 de lavado y enfriamiento, preferiblemente aguas abajo de dicho dispositivo 42 de bombeo; y
- El conducto 52 de baipás para baipasear el dispositivo 50 de separación cuando el gas reductor de nueva aportación alimentado al circuito es solamente el gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso.

Opcionalmente, el humidificador 60 de la línea 11 de tratamiento y alimentación recibe agua caliente por medio de un conducto 54 procedente de la línea de descarga de la unidad 36 de lavado y enfriamiento y descarga el agua a través de un conducto 81.

Preferiblemente, los segundos conductos de la línea 10 de recuperación y tratamiento comprenden, aguas abajo de la unidad 36 de lavado y enfriamiento:

- Un conducto 34 de ramificación, que conecta la línea 10 de recuperación y de tratamiento a los quemadores de la unidad 180 de calentamiento, y en el cual un primer flujo de gas de escape deshidratado puede ser enviado como gas combustible a dichos quemadores; y
- Un conducto 40 de ramificación, que conecta la línea 10 de recuperación y tratamiento a la línea 11 de tratamiento y alimentación y a lo largo del cual están dispuestos el posible dispositivo 42 de bombeo y el dispositivo 50 de separación de dióxido de carbono, y en el cual se recircula un segundo flujo de gas de escape deshidratado.

A lo largo del canal 34 de ramificación está preferiblemente dispuesto otro dispositivo 30 de regulación, por ejemplo, una válvula reguladora de presión.

La unidad 180 de calentamiento se suministra mediante la combustión de un combustible apropiado desde una fuente 182. El combustible puede ser gas de escape deshidratado, procedente del conducto 34 de ramificación, o hidrógeno gaseoso puro o gas natural u otros gases que contienen hidrocarburos o mezclas de los mismos.

En una primera realización del sistema de la invención, mostrada en la Figura 1, la fuente externa 200 del gas que contiene hidrógeno gaseoso, con un contenido de hidrógeno gaseoso igual a al menos 80% en volumen, y la fuente externa 210 del gas que contiene hidrocarburos gaseosos, con un contenido de hidrocarburos gaseosos igual a al menos el 25% en volumen, están conectadas, por ejemplo, directamente, a la línea 11 de tratamiento y alimentación.

En particular, tanto dicha primera fuente externa 200 como dicha segunda fuente externa 210 están conectadas a un tramo del circuito comprendido entre el dispositivo 42 de bombeo de la línea 10 de recuperación y tratamiento y la unidad 180 de calentamiento de la línea 11 de tratamiento y alimentación, preferiblemente entre el dispositivo 50 de separación de dióxido de carbono, o el conducto 52 de baipás, de la línea 10 de recuperación y tratamiento y el humidificador 60 de la línea 11 de tratamiento y alimentación.

El dispositivo 31 de regulación del caudal, por ejemplo, una válvula de control de presión, se dispone preferiblemente a lo largo del conducto 61, que conecta la fuente externa 200 a la línea 11 de tratamiento y alimentación. De manera análoga, el dispositivo 32 de regulación del caudal, por ejemplo una válvula de control de presión adicional, se dispone preferiblemente a lo largo del conducto 71, que conecta la fuente externa 210 a la línea 11 de tratamiento y alimentación.

En una segunda realización del sistema de la invención, mostrada en la Figura 2, la fuente externa 200 del gas que contiene hidrógeno gaseoso y la fuente externa 210 del gas que contiene hidrocarburos gaseosos están conectadas, por ejemplo, directamente, a la línea 10 de recuperación y tratamiento.

En particular, tanto la primera fuente externa 200 como la segunda fuente externa 210 están conectadas a un tramo del circuito comprendido entre la unidad 36 de lavado y enfriamiento y el dispositivo 42 de bombeo, por ejemplo, a lo largo del conducto 40 de ramificación. De esta manera, los gases reductores de nueva aportación también pueden dispensarse a baja presión desde las fuentes externas 200 y 210, comprimiéndose posteriormente por el dispositivo 42 posterior de bombeo.

El dispositivo 31 de regulación del caudal, por ejemplo, una válvula de control de la presión, se dispone preferiblemente a lo largo del conducto 61, que conecta la fuente externa 200 a la línea 10 de recuperación y tratamiento.

El dispositivo 32 de regulación del caudal, por ejemplo, una válvula de control de presión adicional, se dispone preferiblemente a lo largo del conducto 71, que conecta la fuente externa 210 a la línea 10 de recuperación y tratamiento.

Tanto en la primera realización como en la segunda realización del sistema de la invención puede estar comprendido al menos un dispositivo 191 de inyección de gas que contiene hidrocarburos gaseosos para inyectar gas que contiene hidrocarburos gaseosos, tal como gas natural o gas de horno de coque o gas de biomasa o biogás o biometano, en una zona inferior 14, preferiblemente cónica, del reactor 1, colocada debajo de la zona 12 de reducción, o directamente en la zona de transición del reactor 1 entre la zona 12 de reducción y la zona de descarga. En ambos casos, esta inyección permite regular el contenido de carbono del DRI. A continuación, se describe un ejemplo de un proceso, cuando está completamente operativo, para la reducción directa de óxidos de hierro, llevado a cabo por medio de los sistemas descritos de la invención. Este proceso comprende las siguientes etapas cuando está completamente operativo:

a) Recuperar y tratar el gas de escape que sale del reactor 1 por medio de la línea 10 de recuperación y tratamiento;

b) Alimentar gas de proceso a la zona 2 de reducción del reactor 1 por medio de la línea 11 de tratamiento y alimentación, obteniéndose dicho gas de proceso mezclando el gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso procedente de la primera fuente externa 200 y/o el gas de nueva aportación que contiene hidrocarburos gaseosos procedente de la segunda fuente externa 210 con el gas de escape tratado en la línea 10 de recuperación y tratamiento;

en donde se proporcionan además las etapas de:

- Transferir calor del gas de escape que sale del reactor 1 a un fluido de transferencia de calor por medio del primer dispositivo 22 de intercambio de calor de la línea 10 de recuperación y de tratamiento; y

- Si el gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso procedente de la primera fuente externa 200, mezclado con el gas de escape tratado en la línea 10 de recuperación y tratamiento, es suficiente para el proceso de reducción directa, el calor del fluido de transferencia de calor se transfiere completamente a dicho gas de proceso por medio del conducto 75 que transporta el fluido de transferencia de calor al segundo dispositivo 72 de intercambio de calor de la línea 11 de tratamiento y alimentación, que cruza dicho segundo dispositivo 72 de intercambio de calor, y por lo tanto todo el fluido de transferencia de calor alcanza dicho segundo dispositivo 72 de intercambio de calor; mientras que si el gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso procedente de la primera fuente externa 200 no está disponible o no es suficiente, cuando se mezcla con el gas de escape tratado en la línea 10 de recuperación y tratamiento, para el proceso de reducción directa, el gas de nueva aportación que contiene hidrocarburos gaseosos procedente de la segunda fuente externa 210 se mezcla con dicho gas de escape, o con dicho gas de escape y dicho gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso, y el calor del fluido de transferencia de calor se transfiere, respectivamente, completa o parcialmente, al dispositivo 50 de separación de dióxido de carbono. Por lo tanto, si el gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso no está disponible, todo el fluido de transferencia de calor alcanza el dispositivo 50 de separación. Si, en cambio, el gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso está disponible pero no es suficiente, el fluido de transferencia de calor llega parcialmente tanto al dispositivo 50 de separación como al segundo dispositivo 72 de intercambio de calor.

Preferiblemente, para ajustar mejor el funcionamiento del sistema de reducción directa se proporcionan las siguientes etapas:

- Proporcionar datos de entrada que incluyen una señal (118) indicativa de los datos de disponibilidad del gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso;

- Procesar dichos datos de entrada y enviar, preferiblemente por medio de una unidad 64 de control, una primera señal 110 de control al primer dispositivo 62 de regulación del caudal para regular el caudal del fluido de transferencia de calor hacia el dispositivo 50 de separación de dióxido de carbono; una segunda señal 111 de control hacia el segundo dispositivo 65 de regulación del caudal para regular el caudal del fluido de transferencia de calor hacia el segundo dispositivo 72 de intercambio de calor; una tercera señal 112 de control hacia el tercer dispositivo 63 de regulación del caudal para cerrar o abrir al menos parcialmente el conducto 52 de baipás una cuarta señal 114 de control al cuarto dispositivo 32 de regulación del caudal para regular el caudal de gas de nueva aportación que contiene hidrocarburos gaseosos que hay que alimentar al circuito; y una quinta señal 116 de control al quinto dispositivo 31 de regulación del caudal para regular el caudal del gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso que se va a alimentar al circuito.

Por lo tanto, si el gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso procedente de la primera fuente externa 200 está disponible y es suficiente, mezclado con el gas de escape tratado en la línea 10 de recuperación y tratamiento, para todo el proceso de reducción directa, la segunda fuente externa 210 está normalmente cerrada. La unidad 64 de control envía señales 110, 111 de control respectivas al primer 62 y segundo 65 dispositivo de regulación del caudal y la señal 114 de control al cuarto dispositivo 32 de regulación del caudal de modo que el conducto 76 y la segunda fuente externa 210 estén cerrados y el conducto 75 esté abierto. Dicha unidad 64 de control también envía la señal 112 de control al tercer dispositivo 63 de regulación del caudal y la señal 116 de control al quinto dispositivo 31 de regulación del caudal de modo que, respectivamente, el conducto 52 de baipás y la primera fuente externa 200 estén

abiertos. En este caso, el dispositivo 50 de separación es baipaseado completamente.

Cuando el gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso procedente de la primera fuente externa 200 está disponible pero no es suficiente, mezclado con el gas de escape tratado en la línea 10 de recuperación y tratamiento, para todo el proceso de reducción directa, la unidad de control 64 envía, dependiendo de la señal 118 de control procedente de la fuente 200 de gas que contiene hidrógeno gaseoso:

- Una señal 114 de control a dicho cuarto dispositivo 32 de regulación de caudal para la apertura parcial de la segunda fuente externa 210 y, por tanto, para regular el caudal de gas de nueva aportación que contiene hidrocarburos gaseosos que se va a alimentar al circuito,
- Una señal 116 de control al quinto dispositivo 31 de regulación del caudal para regular el caudal del gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso que se va a alimentar al circuito,
- Una señal 110 de control al primer dispositivo 62 de regulación del caudal y una señal 111 de control del segundo dispositivo 65 de regulación del caudal para regular respectivamente el caudal del fluido de transferencia de calor hacia el dispositivo 50 de separación y el caudal del fluido de transferencia de calor hacia el segundo dispositivo 72 de intercambio de calor, siendo los caudales del fluido de transferencia de calor ajustados flexiblemente en función de la proporción de la cantidad de gas que contiene hidrógeno gaseoso y de la cantidad de gas que contiene hidrocarburos gaseosos alimentada al circuito del sistema de reducción;
- Una señal 112 de control al tercer dispositivo 63 de regulación de caudal para un cierre parcial del conducto 52 de baipás y para alimentar parcialmente el dispositivo 50 de separación, siendo dicho cierre parcial y dicha alimentación parcial regulados de manera flexible en función de la proporción de la cantidad de gas que contiene hidrógeno gaseoso y de la cantidad de gas que contiene hidrocarburos gaseosos alimentada al circuito del sistema de reducción.

Por último, si no hay ninguna disponibilidad del gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso procedente de la primera fuente externa 200, la primera fuente externa 200 está normalmente cerrada. La unidad 64 de control envía una señal 110 de control al primer dispositivo 62 de regulación del caudal, una señal 111 de control al segundo dispositivo 65 de regulación del caudal y una señal 114 de control al cuarto dispositivo 32 de regulación del caudal de modo que el conducto 76 y la segunda fuente externa 210 estén abiertos mientras que la parte del conducto 75 proximal al segundo dispositivo 72 de intercambio de calor esté completamente cerrada. Dicha unidad 64 de control también envía una señal 112 de control al tercer dispositivo 63 de regulación del caudal y una señal 116 de control al quinto dispositivo 31 de regulación del caudal de modo que, respectivamente, el conducto 52 de baipás y la primera fuente externa 200 estén cerrados.

En un ejemplo del proceso de la invención, el gas de escape que sale del reactor 1, preferiblemente a una temperatura en el intervalo de aproximadamente 250 °C a aproximadamente 550 °C, se canaliza en un conducto 50 en la línea 10 de recuperación y tratamiento, que lo lleva al primer intercambiador 22 de calor para su enfriamiento.

Opcionalmente, si se usa agua en el primer intercambiador 22 de calor para enfriar el gas de escape que sale del reactor 1, el fluido de transferencia de calor en el conducto 75 será vapor de agua.

Después del enfriamiento, el gas de escape fluye a través de un conducto 24 hacia la unidad 36 de lavado y enfriamiento para separar el agua, obteniendo un gas deshidratado.

Después del enfriamiento y la deshidratación, el gas de escape deshidratado se divide en los dos conductos 34, 40 de ramificación.

Una porción más pequeña de gas de escape deshidratado fluye a través del conducto 34 de ramificación, que tiene una válvula 30 de control de presión con la que una parte del gas de escape deshidratado puede purgarse del circuito para eliminar acumulaciones no deseadas de gases inertes. Mientras tanto, la parte más grande del gas de escape deshidratado fluye a través del conducto 40 de ramificación.

La alimentación de gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso procedente de la primera fuente externa 200 y/o de gas de nueva aportación que contiene hidrocarburos gaseosos procedente de la segunda fuente externa 210 se dispone en la línea 11 de tratamiento y alimentación o en la línea 10 de recuperación y tratamiento.

En el caso de la primera fuente externa 200 y la segunda fuente externa 210 conectadas a la línea 11 de tratamiento y alimentación, dicha alimentación se produce en un tramo del circuito comprendido entre el dispositivo 42 de bombeo de la línea 10 de recuperación y tratamiento y la unidad 180 de calentamiento de la línea 11 de tratamiento y alimentación, preferiblemente entre el dispositivo 50 de separación, o el conducto 52 de baipás, de la línea 10 de recuperación y tratamiento y el humidificador 60 de la línea 11 de tratamiento y alimentación.

- Con referencia a la Figura 1, el gas de escape deshidratado, que fluye en el conducto 40, es empujado por el dispositivo 42 de bombeo, que puede ser un compresor o un soplador, para reciclar tal porción de gas de escape deshidratado y llevarlo al reactor 1 de nuevo. Aguas abajo del dispositivo 42 de bombeo, el gas de escape deshidratado circula por el conducto 44, pasa por el dispositivo 50 de separación de dióxido de carbono y/o el conducto 52 de baipás, y después se mezcla en la línea 11 de tratamiento y de alimentación con el gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso procedente de la primera fuente externa 200 y/o con el gas de nueva aportación que contiene hidrocarburos gaseosos procedente de la segunda fuente externa 210, que define el gas de proceso. El dispositivo 50 de separación de dióxido de carbono puede ser completamente baipaseado por medio del conducto 52 de baipás si no es necesaria la alimentación del gas que contiene hidrocarburos gaseosos.
- En cambio, en el caso de la primera fuente externa 200 y la segunda fuente externa 210 conectadas a la línea 10 de recuperación y tratamiento, dicha alimentación se produce en un tramo del circuito comprendido entre la unidad 36 de lavado y enfriamiento y el dispositivo 42 de bombeo de la línea 10 de recuperación y tratamiento.
- Con referencia a la Figura 2, a diferencia de la realización de la Figura 1, el gas de escape deshidratado, que fluye en el conducto 40, se mezcla en la presente invención con el gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso procedente de la primera fuente externa 200 y/o con el gas de nueva aportación que contiene hidrocarburos gaseosos procedente de la segunda fuente externa 210. La mezcla de gas así obtenida, que define el gas de proceso, es empujada por el dispositivo 42 de bombeo, que puede ser un compresor o un soplador, para llevar dicho gas de proceso a la línea 11 de tratamiento y alimentación. En particular, aguas abajo del dispositivo 42 de bombeo, el gas de proceso fluye a través del conducto 44, pasa a través del dispositivo 50 de separación de dióxido de carbono y/o el conducto 52 de baipás, y luego alcanza la línea 11 de tratamiento y alimentación. El dispositivo 50 de separación de dióxido de carbono puede ser completamente baipaseado por medio del conducto 52 de baipás si no es necesaria la alimentación del gas que contiene hidrocarburos gaseosos.
- En todas las realizaciones, el gas de proceso continúa fluyendo, en secuencia, a través del posible humidificador 60, el segundo intercambiador 72 de calor en el cual se puede aumentar la temperatura del gas de proceso, y luego a través del conducto 15 que llega a la unidad 180 de calentamiento donde el gas de proceso alcanza una temperatura de aproximadamente 850-950 °C.
- El humidificador 60 puede ser completamente baipaseado por el conducto 80 de baipás cuando solamente se alimenta al circuito gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso.
- Aguas abajo de la unidad 180 de calentamiento, el gas de proceso fluye a través del conducto 16 hasta que alcanza el interior del reactor 1.
- Aguas abajo de dicha unidad 180 de calentamiento y aguas arriba del reactor 1 se puede proporcionar una inyección de oxígeno gaseoso en el flujo de gas de proceso por medio de un dispositivo 300 de inyección de oxígeno gaseoso.
- Preferiblemente, se proporciona una inyección de un gas que contiene hidrocarburos gaseosos adicional, tal como gas natural o gas de horno de coque o gas de biomasa o biogás o biometano, en una zona 14 inferior, preferiblemente cónica, del reactor 1, colocada debajo de dicha zona 12 de reducción, o directamente en una zona de transición del reactor 1 entre la zona 12 de reducción y una zona de descarga del reactor, por medio de al menos un dispositivo 191 de inyección.
- El material de óxido de hierro en forma de pelets o terrones se suministra desde arriba a la zona 12 de reducción del reactor 1, y reacciona con el gas reductor caliente, que fluye a contracorriente con respecto al mismo y finalmente se descarga como DRI caliente. Opcionalmente, el material de óxido de hierro tiene un tamaño de partícula de aproximadamente 2,5-19 mm; preferiblemente aproximadamente 3,5-15 mm.

## REIVINDICACIONES

1. Un sistema de reducción directa para la reducción directa de óxidos de hierro, que comprende un circuito de circulación de gas que comprende:

- Un reactor (1) que tiene una zona (12) de reducción adaptada para ser cargada con dichos óxidos de hierro;
- 5 - Una primera fuente externa (200) de gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso con un contenido de gas hidrógeno gaseoso igual a al menos 80% en volumen;
- Una segunda fuente externa (210) de gas de nueva aportación que contiene hidrocarburos gaseosos, preferiblemente con un contenido de hidrocarburos gaseosos igual a al menos 25% en volumen;
- 10 - Una línea (10) de recuperación y de tratamiento, dispuesta aguas abajo del reactor (1), para recuperar y tratar el gas de escape que sale del reactor (1);
- Una línea (11) de tratamiento y de alimentación, dispuesta aguas arriba del reactor (1), para tratar un gas de proceso, obtenido mezclando el gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso procedente de la primera fuente externa (200) y/o el gas de nueva aportación que contiene hidrocarburos gaseosos procedente de la segunda fuente externa (210) con el gas de escape tratado en la línea (10) de recuperación y de tratamiento, y para alimentar la zona (12) de reducción del reactor (1) con dicho gas de proceso;
- 15 en donde la línea (10) de recuperación y tratamiento comunica aguas abajo con dicha línea (11) de tratamiento y alimentación;
- en donde la línea (10) de recuperación y tratamiento comprende al menos un primer dispositivo (22) de intercambio de calor donde el calor se transfiere desde el gas de escape a un fluido de transferencia de calor;
- 20 en donde la línea (11) de tratamiento y alimentación comprende al menos un segundo dispositivo (72) de intercambio de calor;
- en donde un conducto (75), capaz de transportar el fluido de transferencia de calor, conecta el al menos un primer dispositivo (22) de intercambio de calor con el al menos un segundo dispositivo (72) de intercambio de calor, por lo que el calor del fluido de transferencia de calor puede transferirse a dicho gas de proceso por medio de dicho al menos un segundo dispositivo (72) de intercambio de calor;
- 25 en donde la línea (10) de recuperación y tratamiento también comprende al menos un dispositivo (50) de separación de dióxido de carbono para separar dióxido de carbono del gas de escape;
- en donde el conducto (75) tiene una rama (76) que conecta dicho conducto (75) con al menos un dispositivo (50) de separación de dióxido de carbono por lo que el calor del fluido de transferencia de calor puede transferirse completa o parcialmente a dicho al menos un dispositivo (50) de separación de dióxido de carbono;
- 30 y en donde dicha primera fuente externa (200) y dicha segunda fuente externa (210) están conectadas a dicha línea (11) de tratamiento y alimentación o a dicha línea (10) de recuperación y tratamiento.

2. Un sistema según la reivindicación 1, en donde se disponen:

- 35 - Un conducto (52) de baipás en la línea (10) de recuperación y tratamiento para baipasear dicho al menos un dispositivo (50) de separación de dióxido de carbono;
- Un primer dispositivo (62) de regulación del caudal para regular el caudal del fluido de transferencia de calor hacia el al menos un dispositivo (50) de separación de dióxido de carbono;
- Un segundo dispositivo (65) de regulación del caudal para regular el caudal del fluido de transferencia de calor hacia el al menos un segundo dispositivo (72) de intercambio de calor;
- 40 - Un tercer dispositivo (63) de regulación del caudal para cerrar o abrir al menos parcialmente el conducto (52) de baipás;
- Un cuarto dispositivo (32) de regulación de caudal para regular el caudal del gas de nueva aportación que contiene hidrocarburos gaseosos que se va a alimentar al circuito de circulación de gas;
- 45 - Un quinto dispositivo (31) de regulación de caudal para regular el caudal del gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso que se va a alimentar al circuito de circulación de gas; y
- Preferiblemente una unidad (64) de control configurada para enviar una primera señal (110) de control a dicho primer dispositivo (62) de regulación del caudal, una segunda señal (111) de control a dicho segundo dispositivo (65) de regulación del caudal; una tercera señal (112) de control a dicho tercer dispositivo (63) de regulación del caudal; una cuarta señal (114) de control a dicho cuarto dispositivo (32) de regulación del caudal y una quinta

señal (116) de control a dicho quinto dispositivo (31) de regulación del caudal según datos de entrada que incluyen una señal (118) indicativa de los datos de disponibilidad del gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso.

5 **3.** Un sistema según la reivindicación 1 ó 2, en donde el al menos un segundo intercambiador de calor (72) está colocado entre un humidificador (60) y una unidad (180) de calentamiento, estando dicho humidificador (60) y dicha unidad (180) de calentamiento dispuestos en dicha línea (11) de tratamiento y alimentación.

10 **4.** Un sistema según la reivindicación 3, en donde el al menos un primer dispositivo (22) de intercambio de calor está colocado entre el reactor (1) y al menos una unidad (36) de lavado y enfriamiento para separar el agua del gas de escape, obteniendo un gas deshidratado, estando dicha al menos una unidad (36) de lavado y enfriamiento dispuesta en dicha línea (10) de recuperación y tratamiento; preferiblemente en donde se proporciona un conducto (54) adicional que conecta una línea de descarga de la al menos una unidad (36) de lavado y enfriamiento al humidificador (60) para transportar agua caliente al humidificador (60).

**5.** Un sistema según la reivindicación 2 ó 4, en donde la línea (11) de tratamiento y alimentación, además de los primeros conductos a través de los cuales dicho gas de proceso está adaptado para pasar, comprende en secuencia:

- 15
- Al menos un humidificador (60) para regular el contenido de agua del gas de proceso;
  - Dicho al menos un segundo intercambiador de calor (72);
  - Al menos una unidad (180) de calentamiento para calentar el gas de proceso;

y preferiblemente en donde la línea (10) de recuperación y tratamiento, además de los segundos conductos a través de los cuales dicho gas de escape está adaptado para pasar, comprende en secuencia:

- 20
- Dicho al menos un primer intercambiador de calor (22) para enfriar el gas de escape que sale del reactor (1);
  - Al menos una unidad (36) de lavado y de enfriamiento para separar agua del gas de escape, obteniendo un gas deshidratado;
  - Preferiblemente al menos un dispositivo (42) de bombeo para bombear el gas deshidratado en dicha línea (11) de tratamiento y de alimentación;
- 25
- Dicho al menos un dispositivo (50) de separación de dióxido de carbono y dicho conducto (52) de baipás.

**6.** Un sistema según la reivindicación 5, en donde, en el caso de que la primera fuente externa (200) y la segunda fuente externa (210) estén conectadas a dicha línea (11) de tratamiento y alimentación, tanto dicha primera fuente externa (200) como dicha segunda fuente externa (210) están conectadas a un tramo del circuito de circulación de gas comprendido entre el posible dispositivo (42) de bombeo de la línea (10) de recuperación y tratamiento y la unidad (180) de calentamiento de la línea (11) de tratamiento y alimentación, preferiblemente entre dicho al menos un dispositivo (50) de separación de dióxido de carbono, o dicho conducto (52) de baipás, de la línea (10) de recuperación y tratamiento y dicho al menos un humidificador (60) de la línea (11) de tratamiento y alimentación.

**7.** Un sistema según la reivindicación 5, en donde, en el caso de que la primera fuente externa (200) y la segunda fuente externa (210) estén conectadas a dicha línea (10) de recuperación y tratamiento, tanto dicha primera fuente externa (200) como dicha segunda fuente externa (210) están conectadas a un tramo del circuito de circulación de gas comprendido entre la al menos una unidad (36) de lavado y enfriamiento y el al menos un dispositivo (42) de bombeo.

**8.** Un sistema según una cualquiera de las reivindicaciones 5 a 7, en donde los segundos conductos de la línea (10) de recuperación y tratamiento comprenden:

- 40
- Un primer conducto (34) de ramificación, que conecta la línea (10) de recuperación y de tratamiento a los quemadores de la unidad (180) de calentamiento y al que se envía un primer flujo de gas de escape deshidratado como gas combustible para dichos quemadores; y
  - Un segundo conducto (40) de ramificación, que conecta la línea (10) de recuperación y tratamiento a la línea (11) de alimentación y tratamiento y a lo largo del cual están dispuestos el posible al menos un dispositivo (42) de bombeo y el al menos un dispositivo (50) de separación de dióxido de carbono, y en el cual se recircula un segundo flujo de gas de escape deshidratado.
- 45

**9.** Un proceso de reducción directa para la reducción directa de óxidos de hierro, realizado por medio de un sistema según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, proceso que cuando está totalmente operativo comprende las siguientes etapas:

- 50
- a) Recuperar y tratar el gas de escape que sale del reactor (1) por medio de la línea (10) de recuperación y tratamiento;

b) Alimentar gas de proceso a una zona (2) de reducción del reactor (1) por medio de la línea (11) de tratamiento y alimentación, obteniéndose dicho gas de proceso mezclando el gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso que procede de la primera fuente externa (200) y/o el gas de nueva aportación que contiene hidrocarburos gaseosos que procede de la segunda fuente externa (210) con el gas de escape tratado en la línea (10) de recuperación y tratamiento;

en donde se proporcionan además las etapas de:

- Transferir calor desde el gas de escape que sale del reactor (1) a un fluido de transferencia de calor por medio del al menos un primer dispositivo (22) de intercambio de calor de la línea (10) de recuperación y tratamiento;

y en donde si el gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso procedente de la primera fuente externa (200), mezclado con el gas de escape tratado en la línea (10) de recuperación y tratamiento, es suficiente para el proceso de reducción directa, el calor del fluido de transferencia de calor se transfiere completamente a dicho gas de proceso por medio del conducto (75) que transporta el fluido de transferencia de calor a dicho al menos un segundo dispositivo (72) de intercambio de calor de la línea (11) de tratamiento y alimentación, mientras que si el gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso procedente de la primera fuente externa (200) no está disponible o no es suficiente, mezclado con el gas de escape tratado en la línea (10) de recuperación y tratamiento, para el proceso de reducción directa, el gas de nueva aportación que contiene hidrocarburos gaseosos procedente de la segunda fuente externa (210) se mezcla con dicho gas de escape, o con dicho gas de escape y dicho gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso, y el calor del fluido de transferencia de calor se transfiere, respectivamente, completa o parcialmente, a dicho al menos un dispositivo (50) de separación de dióxido de carbono.

**10.** Un proceso según la reivindicación 9, en donde se proporcionan adicionalmente las siguientes etapas:

- Regulación del caudal del fluido de transferencia de calor hacia el al menos un dispositivo (50) de separación de dióxido de carbono por medio de un primer dispositivo (62) de regulación del caudal;

- Regulación del caudal del fluido de transferencia de calor hacia el al menos un segundo dispositivo (72) de intercambio de calor por medio de un segundo dispositivo (65) de regulación del caudal;

- Cerrar o abrir al menos parcialmente un conducto (52) de baipás dispuesto en la línea (10) de recuperación y tratamiento, por medio de un tercer dispositivo (63) de regulación del caudal, para baipasear dicho al menos un dispositivo (50) de separación de dióxido de carbono;

- Regulación del caudal del gas de nueva aportación que contiene hidrocarburos gaseosos que se va a alimentar al circuito de circulación de gas por medio de un cuarto dispositivo (32) de regulación del caudal;

- Regulación del caudal del gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso que se va a alimentar al circuito de circulación de gas por medio de un quinto dispositivo (31) de regulación del caudal.

**11.** Un proceso según la reivindicación 10, en donde se proporcionan adicionalmente las siguientes etapas:

- Proporcionar datos de entrada que incluyen una señal (118) indicativa de los datos de disponibilidad del gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso;

- Procesar dichos datos de entrada y enviar por medio de una unidad (64) de control una primera señal (110) de control al primer dispositivo (62) de regulación del caudal para regular el caudal del fluido de transferencia de calor hacia el al menos un dispositivo (50) de separación de dióxido de carbono; una segunda señal (111) de control al segundo dispositivo (65) de regulación del caudal para regular el caudal de fluido de transferencia de calor hacia el al menos un segundo dispositivo (72) de intercambio de calor;

- Una tercera señal (112) de control hacia el tercer dispositivo (63) de regulación del caudal para cerrar o abrir al menos parcialmente un conducto (52) de baipás para posiblemente baipasear dicho al menos un dispositivo (50) de separación de dióxido de carbono;

- Una cuarta señal (114) de control al cuarto dispositivo (32) de regulación del caudal para regular el caudal de gas de nueva aportación que contiene hidrocarburos gaseosos que se va a alimentar al circuito de circulación de gas; y una quinta señal (116) de control al quinto dispositivo (31) de regulación del caudal para regular el caudal del gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso que se va a alimentar al circuito de circulación de gas.

**12.** Un proceso según la reivindicación 10 u 11, en donde, si se usa agua para enfriar el gas de escape que sale del reactor (1) en dicho al menos un primer dispositivo (22) de intercambio de calor, el fluido de transferencia de calor en el conducto (75) es vapor de agua.

- 13.** Un proceso según cualquiera de las reivindicaciones 9 a 12, en donde dicha alimentación de gas de nueva aportación que contiene hidrógeno gaseoso procedente de la primera fuente externa (200) y/o gas de nueva aportación que contiene hidrocarburos gaseosos procedente de la segunda fuente externa (210) se dispone en la línea (11) de tratamiento y alimentación o en la línea (10) de recuperación y tratamiento.
- 5     **14.** Un proceso según la reivindicación 13, en donde, en el caso de que la primera fuente externa (200) y la segunda fuente externa (210) estén conectadas a la línea (11) de tratamiento y alimentación, dicha alimentación se produce en un tramo del circuito de circulación de gas comprendido entre un dispositivo (42) de bombeo de la línea (10) de recuperación y tratamiento y al menos una unidad (180) de calentamiento de la línea (11) de tratamiento y alimentación, preferiblemente entre dicho al menos un dispositivo (50) de separación de dióxido de carbono, o dicho
- 10    **15.** Un proceso según la reivindicación 13, en donde, en el caso de que la primera fuente externa (200) y la segunda fuente externa (210) estén conectadas a la línea (10) de recuperación y tratamiento, dicha alimentación se produce en un tramo del circuito de circulación de gas comprendido entre una unidad (36) de lavado y enfriamiento y un
- 15    **16.** Un proceso según cualquiera de las reivindicaciones 9 a 15, en donde se proporciona regulación de la presión de operación del sistema para compensar parcial o completamente la diferencia de peso molecular debida a diferentes porcentajes de uso del gas de nueva aportación que contiene hidrocarburos gaseosos y del gas de nueva aportación que contiene hidrocarburos gaseosos.
- 20    **17.** Un proceso según la reivindicación 16, en donde se dispone una inyección de nitrógeno tanto para aumentar el peso molecular del gas de proceso circulante como para usar el nitrógeno presente en el gas de proceso circulante como vector de energía térmica dentro del reactor.



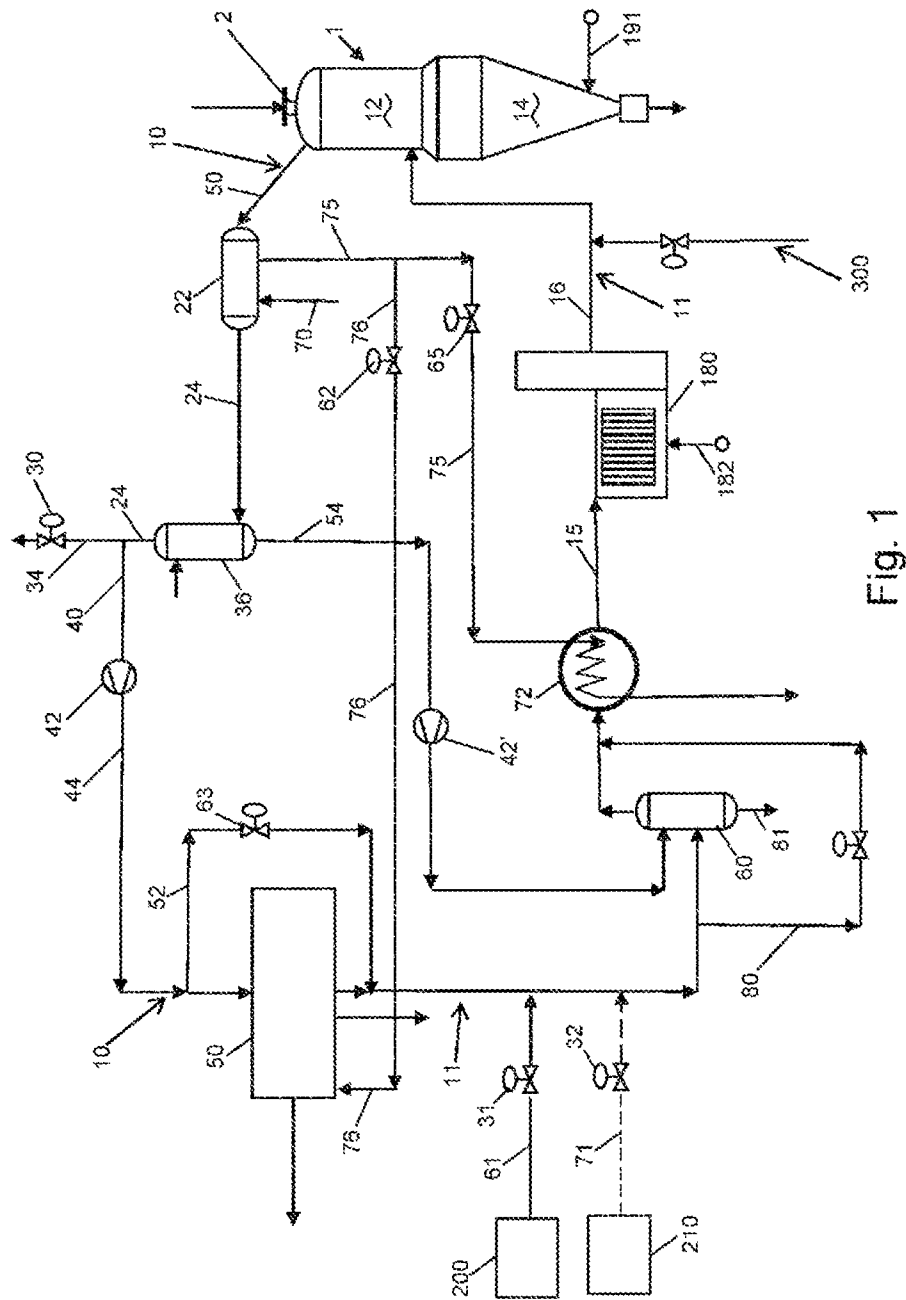


Fig. 1

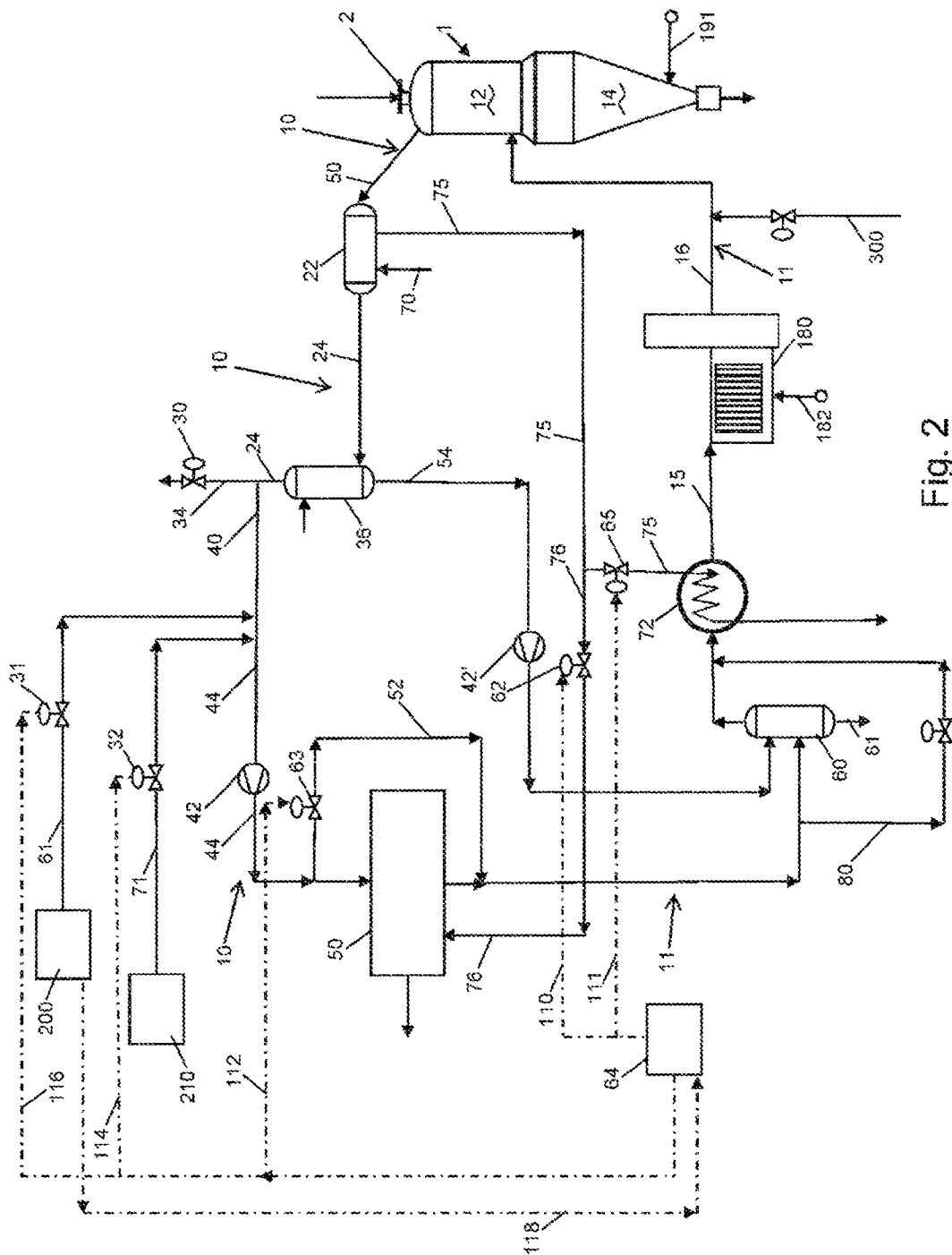


Fig. 2